

氏名（本籍）	小田 憲一（石川県）		
学位の種類	博士（工学）		
学位授与番号	甲第 395 号		
学位授与日付	平成 23 年 3 月 25 日		
専攻	生産開発システム工学専攻		
学位論文題目	雪崩の挙動予測を目的とした数値解析手法の高度化 (Development of a numerical method for prediction of snow avalanche)		
学位論文審査委員	(主査) 教授 藤田 裕一郎 (副査) 准教授 沢田 和秀 准教授 神谷 浩二		

論文内容の要旨

雪崩は災害規模が甚大であり、今後発生しうる雪崩に対して的確な対策を施すことは極めて重要である。しかしながら、近年の公共事業費の削減や効率的な公共投資のニーズが高まる社会情勢の中で、技術的に満たされた防災対策を施し、万全の体制を整えることは容易ではなくなっている。現状で求められていることは、コスト面に優れた高水準の雪崩防災技術を開発することである。この実現化を目指して、これまでのようなハード対策に偏った対策ではなく、ソフト対策を併用した安全で廉価な雪崩対策に注目が高まっている。

本研究では、地盤の大変形問題を対象とした流体力学に基づく数値解析手法を、雪崩の流動予測に適用した。この手法は、構成則として Mohr-Coulomb の破壊規準を考慮した Bingham 流体モデルを用いており、地盤材料の粘着力と内部摩擦角を入力パラメータとして与えることで、土砂の複雑な流動挙動を表現する。本研究では、対象とする雪崩の運動形態として流れ型の雪崩に着目した。雪崩災害は、流れ型の雪崩の運動に起因することがほとんどであるため、従来から自然斜面での観測や模型実験がなされている。これまでは、雪崩の到達距離、底面の摩擦特性、衝撃力などを加味し、経験則に基づく統計的な流動予測が行われてきた。しかし、統計的な手法では、雪崩の流下挙動に大きな影響を及ぼす地形の影響を詳細に反映することは難しい。また、数値解析による予測手法の開発も精力的に行われているが、従来の手法は静水圧近似を仮定した運動方程式を基礎とするものが多い。そのため、地形の急激な変化点での飛び出し、流下経路の植生間のすり抜け、構造物に衝突した際の衝撃力など、重要な検討項目について精度よく雪崩の挙動を再現することが難しい現状にある。対して、本研究で用いる解析手法は、流体の運動方程式を直接解くため、先述の複雑な流動挙動を表現することができる。本研究は、各種実験とその再現解析、および実際の雪崩の再現解析を通じて、提案手法の雪崩流動予測に対する適用性を確認することを目的としている。

まず、回転粘度計を用いて、雪材料の流動特性に関する実験を実施した。解析手法の中では、対象となる材料を Bingham 流体として仮定しているため、流動中の雪材料が Bingham 流体として仮定できるかどうかを確認した。Stormer 型の回転粘度計を用いて流動化した雪のせん断抵抗とひずみ速度の関係を測定し、その結果から、流動化した雪が Bingham 流体として仮定できることを示した。さらに、雪のせん断強度特性を簡易一面せん断試験から求め、得られた結果と過去に行われた雪のせん断試験の結果から、雪のせん断特性が Mohr-Coulomb の破壊規準で関係付けられることを示した。また、解析手法についても改良を加えている。雪崩の運動予測には、雪崩と斜面の摩擦特性を考慮することが重要であるため、任意の底面摩擦を表現可能とする改良を加えた。また、流動材料の質量の保存性を確保するために、新たな自由界面の捕獲方法を導入した。(第 3 章)

次に、提案した数値解析手法を検証するために、雪崩の室内模型実験を実施した。三種類の雪崩発生装置と二種類の受圧装置を用いて、人工的に発生させた雪崩の流動形状、到達距離、衝撃力、堆積形状のデータを整理した。得られた実験結果は、非常に再現性が高く、数値解析の検証材料として十分な精度を有していることが確認された。(第 4 章)

第 5 章では、模型斜面を用いた人工雪崩の再現解析を行い、計算によって求められた雪崩の速度、衝撃力、到達距離を実験結果と比較し、雪崩に対する流動解析手法の有効性について検討した。ここでは、雪崩の到達距離や衝撃力についての数値解析による再現性を確認した。また、メッシュサイズと底面摩擦が解析結果に与える影響も検討項目とした。検討の結果、解析手法は、実験結果から得られた雪崩の到達距離や衝撃力を概ね再現することが確認され、解析手法の雪崩流動予測に対する適用性が確認された。しかしながら、解析の中では、矩形のメッシュが採用されており、斜面を矩形メッシュで表現した場合、地表

面が階段状になり、それが数値振動や流動速度の低下を発生させる原因となる別の問題も明らかとなった。

最後に、これまでの成果を基に、実際に発生した雪崩を対象とした三次元再現解析を行い、実際の雪崩への適用性を検証した。まず、解析パラメータの違いによって実際に発生した雪崩の到達距離がどのように変化するか検証し、得られた結果を基に解析パラメータを決定した。決定したパラメータを用いて、観測された雪崩を対象とした再現解析を行い、実際の雪崩の流動速度と比較することで、本解析手法の適用性を検証した。これらの結果より、本解析手法は適切な解析パラメータを用いることで、実際の雪崩を十分再現することができることが確認された。また、雪崩の危険箇所を含む地域を対象として、本解析手法を用いて雪崩のハザードマップを作成した。実際に雪崩が発生した危険箇所のデータと比較し、本解析手法が雪崩の影響範囲を予測する一つ的手段として有効であることを示した。(第6章)。

論文審査結果の要旨

日本国内には豪雪地帯およびそれに準ずる地域が広範囲に分布しており、それらの地域で毎年のように雪崩の被害が報告されている。雪崩の発生を抑制する、または被害を最小限に留めるためには、雪崩の流下挙動を事前に予測する必要がある。我が国においては、実務的レベルでは「見通し角」などの簡便な経験的予測手法を用いて雪崩の到達範囲の評価が行われることが多いが、この方法では地形や積雪量などの影響を表現することは難しく、精度よく雪崩の流下挙動を予測できる手法の開発が待ち望まれている。このような背景のもと、本論文は、流体力学に基づく大変形解析手法を高度化して、雪崩の流動予測に適用することを試みたものである。

まず、流動化した雪の流動特性を把握するために、雪の内部に含まれる空気量を制御した回転粘度計を用いて実験を実施し、結果に基づいて流動化した雪が Bingham 流体として仮定できることを確認している。これにより、既存の流体力学に基づく大変形解析手法の中で用いられている流体モデルが、雪崩の流動特性を表現可能であるということを確認している。実験方法やアプローチは適切であり、また、実験結果は適切に整理されている。

次に、既存の手法の問題点を整理し、次のように各問題に対する改良を加えている。既存の手法では、移動する物質の体積の保存性に問題であったが、新たに THINC 法を導入することによりこの問題を解決している。また、既存の手法では底面摩擦の状態を適切に表現することができなかったが、速度の境界条件を工夫して、任意の底面摩擦状態を設定できる方法を提案した。これらの改良は、雪崩の流動解析に対して極めて重要であるとともに、既存の手法がこれまでに対象としてきた土砂の流動解析についても有益なものである。

数値解析手法の検証のために、低温室内での模型斜面を用いた雪崩の実験を繰り返し実施し、非常に再現性の高い結果を得ている。数値解析では、実験で観測された結果が、改良した解析手法で表現可能であることを示し、解析手法の精度の高いことを検証している。この実験結果は、本論文の中では再現解析の対象としてのみ扱われているが、雪崩の流動挙動を考える上での必要な実験データであり、今後の関連研究に対して有益な情報を提供するものと考えられる。また、再現解析の結果から、実験結果を概ね再現できていること、改良した底面摩擦の影響を適切に表現できていることが確認されている。

最後に、実際の雪崩に対して本提案解析手法を適用し、その中で設定パラメータを検討することにより、新潟県の一部地域を対象とした雪崩のハザードマップの作成を試みている。その結果、パラメータを適切に決定することで、本論文で高度化した解析手法は、雪崩の到達距離や流下速度を精度よく予測することが可能であり、ハザードマップ作成等の重要な情報を提供できることが示された。これらの成果は、実務的に非常に重要かつ有用な知見である。

最終試験結果の要旨

藤田裕一郎、沢田和秀、および神谷浩二で構成する審査委員会では、本論文と別刷りなどを慎重に検討した。その結果、本論文は学位論文として十分に完成された内容を有していること、提出された学位論文および査読付き発表論文2編は、申請者により書かれていることを確認した。

また、最終試験(公聴会)を平成23年2月7日に開催し、審査委員会での審査の結果、合格と判定した。